

超低渗透油藏 CO_2 驱储层流体沉淀 规律与数值模拟技术

赵东锋 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

基金

渗透油藏 CO_2 驱 CO_2 -地层水-原油-岩石相互作用机

经费资助

超低渗透油藏 CO_2 驱储层流体沉淀 规律与数值模拟技术

赵东锋 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书共六章。第一章介绍了超低渗透油藏 CO_2 驱储层流体沉淀研究现状的介绍;第二章介绍了超低渗透油藏 CO_2 驱储层流体沉淀静态物理实验研究;第三章介绍了超低渗透油藏 CO_2 驱储层流体沉淀动态物理实验研究;第四章介绍了考虑 CO_2 与流体作用生成沉淀的 CO_2 驱数值模拟技术;第五章介绍了超低渗透油藏 CO_2 驱过程中流体沉淀对储层物性及开发参数影响。最后为超低渗透油藏 CO_2 驱过程中储层流体沉淀未来研究的方向总结。

本书可供油田开发矿场的工程技术人员以及油气田开发专业提高采收率方向的科研人员使用,也可供高校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

超低渗透油藏 CO_2 驱储层流体沉淀规律与数值模拟技术/赵东锋著. —上海:上海交通大学出版社,2018
ISBN 978-7-313-18430-6

I. ①超… II. ①赵… III. ①低渗透油气藏—二氧化碳
碳—驱油—研究 IV. ①TE357.45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 294446 号

超低渗透油藏 CO_2 驱储层流体沉淀规律与数值模拟技术

著 者:赵东锋

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:谈 毅

印 制:虎彩印艺股份有限公司

开 本:889mm×1194mm 1/32

字 数:204 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-18430-6/TE

定 价:78.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:8.25

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0769-85252189

前 言

PREFACE

低渗透油藏注 CO_2 开发可以弥补注水开发“注不进,产不出”的不足,具有很好的应用前景。然而, CO_2 是一种特殊的气体,当其注入储层时,一方面 CO_2 会溶入地层水中,形成碳酸,碳酸进一步电离成的 H^+ 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 与地层水中的无机盐离子,在油藏条件发生变化时会生成无机盐沉淀,沉淀会堵塞岩石孔喉,对储层岩石的孔隙结构和渗透率造成影响,从而影响 CO_2 驱采收率。另一方面,在 CO_2 注入储层后, CO_2 会引起原油中的沥青质发生絮凝和沉淀,沉淀的沥青质也会堵塞岩石孔喉,降低孔隙度和渗透率,对 CO_2 驱提高采收率造成影响。因此研究 CO_2 驱过程中 CO_2 与储层流体(地层水和原油)作用生产沉淀的机理及其对储层物性和开发效果的影响规律具有重要意义。

本书介绍了超低渗透油藏 CO_2 驱储层流体沉淀规律及数值模拟技术方面的研究及成果。研究主要通过物理实验、理论分析和数值模拟相结合的方法,深化了二氧化碳驱渗流机理、驱油机理的认识,发展了数值模拟技术方法,提升了二氧化碳驱提高采收率技术适应性认识。取得以下成果:

(1)设计了耐高温高压的 CO_2 与地层水作用的可视反应容器和

CO₂与原油作用沥青质沉淀高压可视釜两套装置,分别测定了不同矿化度的地层水与CO₂在不同压力温度条件下生成的无机盐沉淀物质成分和沉淀量、不同沥青质含量的原油与CO₂在不同压力温度条件下生成沥青质沉淀的量,分析了地层水矿化度、沥青质含量、地层压力及地层温度对沉淀量的影响,建立了压力、温度、矿化度、沥青质含量与沉淀量的定量评价模型。

(2)设计了去离子水—去沥青质原油、地层水—去沥青质原油、地层水—含沥青质原油三大类流体条件下的低渗透油藏CO₂水气交替岩心驱替实验方法,分析对比了相同压力、温度条件下岩心的渗透率、孔隙度、岩石质量、岩石表面矿物组成、表面元素组成、岩石表面微观形貌、地层水中离子组成的变化特征,获得了CO₂溶蚀作用、CO₂—地层水沉淀作用、CO₂—原油沥青质沉淀作用及其综合作用下对储层物性及开发参数的影响程度。建立了压力、温度、矿化度、沥青质含量与渗透率、孔隙度、驱油效率变化量的定量表征模型。

(3)在实验测试结果基础上建立了地层水的矿化度与无机盐沉淀物质沉淀量、原油的沥青质含量与沥青质沉淀量的定量关系,提出了多种因素综合作用下的沉淀阻力因子表征模型。基于以上研究结果和物质守恒定律建立了考虑流体沉淀对储层孔隙度、渗透率、原油物性影响的二氧化碳动态混相驱油的多相多组分数学模型,并编程求解,通过与等尺寸的岩心实验结果对比验证了该模型的可靠性。

(4)利用所编制的数值模拟模块,建立了油藏数值模型,研究了不同类型油藏条件下二氧化碳驱对储层物性、开发参数的影响规律,提出了低渗透油藏二氧化碳驱适宜性评价的地层水矿化度和沥青质含量筛选指标界限。

本书介绍的研究成果揭示了二氧化碳与高矿化度地层水、原油的作用机理,推进了二氧化碳驱理论和数值模拟方法的发展,提升了低渗透油藏 CO_2 驱提高采收率技术适应性和开发规律的认识;可以有力指导含高矿化度地层水的低渗透油藏二氧化碳驱技术矿场应用。

本书参考和引用了许多中外文文献,特向原作者致谢。由于编者学识和水平有限,书中存在的缺点和不足之处,恳请读者批评指正。

赵东锋

2017 年 9 月

目 录

CONTENTS

第一章 绪论	1
第一节 背景及研究意义	3
第二节 国内外研究现状	6
第二章 高压釜中 CO_2 —地层流体作用后沉淀特征及影响因素分析	19
第一节 地层流体组成特征分析	23
第二节 CO_2 与地层水反应后生成沉淀物条件及沉淀物成分分析	26
第三节 CO_2 与地层水反应后生成无机盐沉淀物影响因素分析	45
第四节 CO_2 与原油反应后生成沥青质沉淀影响因素分析	59
第三章 CO_2 岩心驱过程 CO_2 与地层流体反应后沉淀对储层物性及开发效果研究	77
第一节 实验设备及实验流程	82

第二节	CO ₂ —水—岩石作用后对储层物性及开发效果影响研究	90
第三节	CO ₂ 与地层水作用后生成的沉淀对储层物性及开发效果影响研究	106
第四节	CO ₂ 与原油作用后沥青质沉淀对储层物性及开发效果影响研究	125
第四章	考虑 CO ₂ 与流体作用生成沉淀的 CO ₂ 驱数值模型研究	139
第一节	考虑 CO ₂ 与流体作用生成沉淀的 CO ₂ 驱数值模型建立	142
第二节	模型关键参数确定方法研究及可靠性分析	165
第五章	低渗透油藏 CO ₂ 驱过程中流体沉淀对储层物性及开发参数影响研究	171
第一节	数值模拟模型构建	174
第二节	CO ₂ 与地层水反应储层物性及开发参数影响规律研究	184
第三节	CO ₂ 与地层油作用对储层物性及开发参数影响规律研究	208
第六章	结论及展望	233
参考文献		239
索引		253

第一章

绪 论

第一节 背景及研究意义

随着开发程度的进行,我国优质油气田的储量呈现逐年减少的现状,但随着勘探开发技术的提高,低渗透、超低渗透油田储量所占的比例与日俱增^[1,2]。在低渗透油藏的开发中,其中超低渗透油藏占了很大的比例,如长庆油田超低渗透油藏占到60%,是未来开发的主战场,合理开发超低渗透储层,已经成为当前以及日后缓解我国石油后备储量的中坚力量,对我国石油行业的持续发展具有举足轻重的作用^[3-6]。针对低渗透油藏($10.1 \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)通过压裂、精细注水已经能达到不错的开发效果,但对特低渗油藏($1.1 \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和超低渗透油藏($0.1 \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)注水开发已经越来越难,由于超低渗透储层油井注水开发见效慢,开发难度大,如何有效开发超低渗透油藏是目前国内外面临的主要问题^[7-10]。

二氧化碳(CO_2)在地层中具有流动性好、能够使原油体积发生大幅度膨胀、大幅度降低原油粘度、降低油气界面张力、与原油发生混相作用等优点。因此,注入地层中的 CO_2 能够波及水驱难以波及的低渗透区域,并与地层原油充分接触,驱动地层剩余油,有效提高微观和宏观驱油效率,进而达到提高原油采收率的目的^[11-13]。并且, CO_2 的这种优势在超低渗透油藏表现得尤为突出。 CO_2 驱不仅可以提高石油采收率,而且还能够实现 CO_2 的地下封存,从而减少大气中人为排放的 CO_2 ,达到节能减排的

目的^[12-16]。

超低渗透油藏以微小孔隙和微细细喉道为主,比表面积异常大,储层容易遭受污染和伤害,超低渗透油藏的储层保护是一个至关重要的问题。CO₂是一种特殊的气体,当其注入储层时,一方面CO₂会溶入地层水中形成碳酸,碳酸进一步电离成出的H⁺、HCO₃⁻和CO₃²⁻离子与地层水中的无机盐离子作用,在周围油藏条件发生变化时生成无机盐沉淀,生成的沉淀会堵塞岩石孔喉,对储层岩石的孔隙结构和渗透率造成影响,从而影响CO₂驱采收率^[17-27]。

另一方面,在CO₂注入储层后,CO₂会引起原油中的沥青质发生絮凝和沉淀,沉淀的沥青质会堵塞岩石孔喉,降低孔隙度和渗透率,改变岩石的润湿性,对CO₂驱提高采收率造成影响^[28-42]。因此开展CO₂驱过程中CO₂与储层流体(地层水和原油)作用生产沉淀的规律,及其对储层物性和采收率的影响规律的研究具有举足轻重的作用。

鉴于上述原因,本书从CO₂在地层水和原油中的溶解入手,采用室内实验、油藏工程、地球化学及数值模拟相结合的手段,开展超低渗透油藏CO₂驱沉淀规律及其对采收率影响规律研究。通过静、动态实验研究CO₂与地层水、原油作用引起的无机盐、沥青质沉淀规律,分析矿化度、沥青质含量、压力、温度对无机盐、沥青质沉淀量的影响,研究无机盐、沥青质沉淀规律及其对低渗透岩石物性的影响,依据实验结果,采用数学分析方法、相平衡热力学和流体热力学理论,建立CO₂浓度、矿化度、沥青质含量与渗透率、孔隙度等因素的二氧化碳动态混相驱油的多相多组分数学模型,采用有限差分方法和IMPES方法形成了数值模拟模块,

应用该数值模拟模块,研究了不同油藏条件下二氧化碳驱对储层物性、开发参数的影响规律,根据影响规律提出了地层水矿化度和原油沥青质含量两个新的二氧化碳驱适宜油藏的筛选指标,并确定了其界限,本书的研究对推进二氧化碳驱理论发展和更有效的开发低渗透油藏具有重要指导意义。

第二节 国内外研究现状

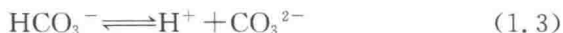
一、注 CO₂ 过程中 CO₂—地层水—岩石相互作用研究

在 CO₂ 驱替过程中,注入 CO₂ 与地层中的地层水相遇,CO₂ 溶入地层水形成酸性流体,在储层条件下,酸性流体与岩石接触发生复杂的化学反应,即 CO₂—地层水—岩石相互作用,由于岩石的溶蚀会使储层孔隙增大,渗流能力增强,改善储层^[20,22-24,26,43,44]。同样,随着岩石的不断溶蚀,大量的离子进入地层水中,随着地层水中成垢离子浓度的增加,在储层条件发生变化时,形成次生矿化或结垢使储层孔隙度降低,渗透率下降,造成储层的阻塞^[45-50]。20 世纪 60 年代早期大庆油田曾进行过注碳酸水的试验,采收率曾提高了 10.5%,但后期由于结垢现象太严重,再加上腐蚀问题,最终放弃了矿场试验^[45]。

1. CO₂ 与水相互作用

CO₂ 溶入水中后,大量的 CO₂ 仍然以自由 CO₂ 分子的形式存在,只有一小部分 CO₂ 与水结合形成碳酸,碳酸分解成氢离子和碳酸氢根,碳酸氢根进一步电离分解成氢离子和碳酸根,如式(1.1)~式(1.3)所示。





CO_2 在水中的溶解度比 CO_2 在原油中溶解度小得多,而 CO_2 在水中的溶解速度比在油中的溶解速度快。 CO_2 在水的溶解度随水压力增加而增加,随温度升高而降低,水的矿化度越高 CO_2 在其中的溶解度越低。

Wiebe 等人^[51]最早研究了温度 100°C 、压力 70MPa 条件下, CO_2 在水中的溶解度。Teng 等人^[52]通过研究温度、压力与 CO_2 在水中溶解度的关系,提出 CO_2 —水体系的亨利常数是温度和压力的函数。在此基础上,Enick 等人^[53]通过总结大量的文献数据资料提出了计算 CO_2 —水体系亨利常数的经验公式。Duan 和 Sun^[54]利用气体状态方程和液体的相互作用理论改进了溶解模型,利用这个模型,压力 $0\sim 200\text{MPa}$,温度 $0\sim 260^\circ\text{C}$ 范围内, CO_2 在纯水和 NaCl 溶液中的溶解度都可以精确地计算出来。

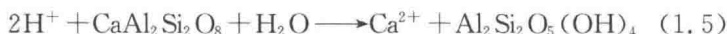
2. CO_2 溶蚀岩石矿物

二氧化碳与地层水结合形成 H_2CO_3 , H_2CO_3 电离出 H^+ 和 HCO_3^- ,由于 H^+ 和 HCO_3^- 的增加地层水的酸度增加,与 CaCO_3 方解石反应生成 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$,如式(1.4)所示^[55]:

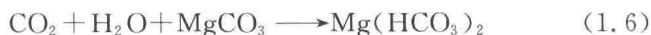


Robin G. C. Bathurst 和 John P. M. 等人^[56]研究 CO_2 溶液对方解石的溶解于压力和温度的关系。研究表明, CO_2 对方解石的溶蚀随压力升高而增加,随温度升高而增强。

CO_2 对硅酸盐的溶蚀作用^[57],如式(1.5)所示:

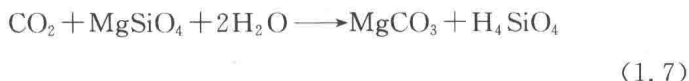


CO_2 酸性流体对白云石的溶蚀作用^[58],如式(1.6)所示:

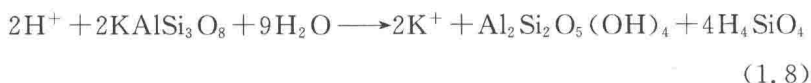


Busenberg E. 和 Plummer L. N. 等人^[59]研究了 CO₂酸性流体与白云石体系溶蚀速度与压力的关系,得出在低压范围内(0~96kPa),白云石的溶蚀速度与 CO₂压力的平方根成正比。

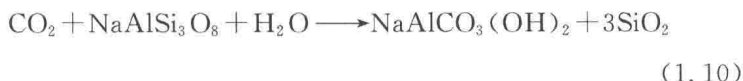
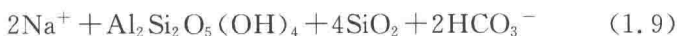
CO₂对镁橄榄石的溶蚀作用^[60],如式(1.7)所示:



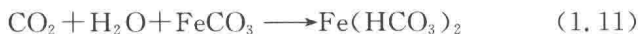
CO₂对钾长石的溶蚀作用^[58],如式(1.8)所示:



CO₂对钠长石的溶蚀作用^[61],如式(1.9)和式(1.10)所示:



CO₂对菱铁矿的溶蚀作用^[62],如式(1.11)所示:



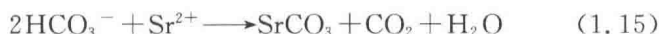
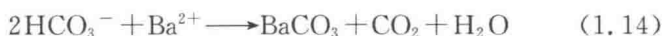
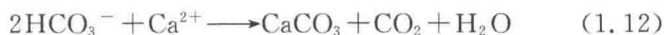
3. CO₂引起储层矿物沉积

前人研究认为 CO₂溶于地层水形成的酸性流体溶蚀岩石中的胶结物,提高了储层的渗透率,但同时由于地层水中成垢离子的不断增加,在储层压力、温度等条件发生变化时生成次生矿物,堵塞孔隙使储层渗透率降低^[47-49,55,63-70]。

(1)沉淀机理。CO₂酸性流体不断溶蚀岩石,使地层水中的成垢离子不断增加,在成垢离子达到一定含量后,在储层条件发生变

化时就会生成次生矿物,形成结垢^[47-49,69,70]。

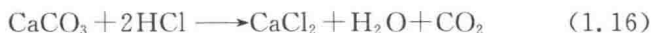
由于前面介绍的溶蚀反应,使地层水的成垢离子浓度增加,进而发生反应形成碳酸盐垢。如式(1.12)~式(1.15)所示:



陈育红等人^[45]研究认为 CO_2 溶于水后形成碳酸水,呈现出不同的酸性,酸性流体由于溶蚀岩石进而引起结垢,生成垢的主要是碳酸垢。地层水矿化度越高,碳酸钙在地层水中的溶解度越大,在一定程度上降低垢的形成,碳酸镁在水中的溶解度大于碳酸钙的溶解度,碳酸镁的沉淀趋势小于碳酸钙。

Watson 等人^[71]研究了澳大利亚 Otway 盆地 CO_2 气藏中 CO_2 的作用,在气藏储层岩石中观察到铁白云石的生成。高巧玉等人^[22]研究了海拉尔盆地的 CO_2 砂岩气藏,在 CO_2 作用过程中观察到菱铁矿、片钠铝石、铁白云石等次生矿物形成。

石美、郭平等^[48]采用从矿场取回的地层水和天然岩心进行注 CO_2 对储层影响实验研究。实验结果表明 CO_2 对岩石内部既有溶蚀,又有结垢物形成。形成的结垢物阻塞部分喉道,使渗透率降低。他们认为溶蚀和结垢两种效应都存在,并通过测量逸出 CO_2 气体的体积,求得碳酸盐的含量,化学反应方程式如式(1.16),从而说明结垢作用应该占主导。电镜扫描结果也验证了这个结论。



(2)各因素影响规律。压力的影响:Ryzhenko B. N. ^[61]和 Kapelke M. S. ^[72]等认为碳酸盐的沉淀受 CO_2 分压的影响。刘再